

Визначення параметрів руху сипкого середовища в відцентровому змішувачі безперервної дії методом дискретних елементів**В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, С. А. Демішонкова**

Розглянуто процеси створення композицій сипких матеріалів у відцентрових змішувачах безперервної дії. На основі методу дискретних елементів розроблено математичну модель руху частинок у роторі відцентрового змішувача з врахуванням їх геометричних і фізико-механічних параметрів. Для оцінки ступеню впливу цих параметрів на характер руху частинок використана відома математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, що створена на основі класичних законів механіки. Проведено моделювання процесу змішування частинок двох сипких матеріалів за різних початкових умов руху. Розраховано траєкторії окремих частинок вздовж dna та бічної стінки ротора.

В результаті проведених досліджень встановлено, що модель, розроблена на основі методу дискретних елементів, дозволяє підвищити точність визначення параметрів руху сипких матеріалів у зоні змішування. Розрахунки за цим методом свідчать, що довжина траєкторії частинок у 2,9, а час руху – у 9 разів більші ніж розраховані за системою диференціальних рівнянь. Розроблена та відомі математичні моделі показали однаковий характер розподілу компонентів у змішувачі. Значення коефіцієнту кореляції Пірсона між розрахованими значеннями коефіцієнтів варіації дорівнює 0,758. Найкраща однорідність досягається за умови розділення потоків компонентів суміші та зменшення відстані між їх центрами.

Експериментальні дослідження проведено з використанням відцентрового змішувача безперервної дії з конічним ротором. Побудовано траєкторії частинок та встановлено, що форма траєкторії, яка отримана методом дискретних елементів ближча до експериментальної.

Отримані результати дозволяють прогнозувати вплив конструктивних та технологічних параметрів змішувачів безперервної дії на однорідність суміші.

Ключові слова: метод дискретних елементів, відцентровий змішувач, сипкий матеріал, безперервне змішування, однорідність суміші.

1. Вступ

У легкій, хімічній та інших галузях промисловості приготування композицій сипких матеріалів здійснюється за допомогою змішувачів різноманітних типів та конструкцій [1–3]. Вимоги до такого обладнання та принцип його роботи залежать від фізико-механічних властивостей вхідних матеріалів, їх гранулометричного складу та заданих параметрів якості готової композиції [4, 5]. Кількість компонентів, що змішується, визначається рецептурою суміші. Розміри частинок вхідних матеріалів змінюються у широких межах в залежності від форми, в якій постачається матеріал (порошки, гранули), що практично унеможливує ство-

рення універсального змішувального обладнання [6, 7]. Водночас, сьогодні при створенні сумішей полімерних матеріалів прослідковується тенденція збільшення використання гранул [3, 8, 9]. Це пов'язано з поширенням на ринку різноманітних суперконцентратів барвників, які постачаються саме у вигляді гранул. Порівняно з порошкоподібними барвниками у формі порошків, вони дозволяють уникнути проблем пов'язаних з чищенням обладнання при зміні кольору барвника, забруднення повітря, зсипання порошку у нижні шари суміші та інших. Також при виготовленні ряду товарів часто використовується вторинна сировина, яка також постачається у вигляді гранул. Таким чином, в багатьох випадках компоненти полімерних композицій є частинками сферичної, еліпсоїдальної, циліндричної форм та діаметром у межах від 5 до 7 мм [1, 6]. Відсотковий вміст компонентів змінюється в межах від десятих до десятків відсотків, але в будь-якому випадку змішувальне обладнання має забезпечувати необхідне значення основного параметру якості суміші – її однорідності [6]. Для приготування композицій застосовуються змішувачі періодичної та безперервної дії, які для перемішування компонентів використовують ті чи інші фізичні ефекти. Особливе місце займають відцентрові змішувачі безперервної дії (ВЗБД), що забезпечують необхідну однорідність суміші, відносно низький вплив робочих органів на частинки та високу продуктивність [2]. Водночас, у змішувачах безперервної дії технічно складно забезпечити контроль однорідності сипкого середовища та, відповідно, керувати процесом приготування композиції. Створення математичних моделей руху сипкого середовища в робочому об'ємі змішувачів такого типу дозволить оцінити характер руху частинок. Визначити вплив гранулометричного складу, характеру завантаження, конструкції змішувача та швидкості руху робочих органів на траєкторії руху. Це дозволить забезпечити умови для проектування змішувачів з параметрами близькими до оптимальних, що визначає актуальність проведення таких досліджень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [10] авторами представлено результати досліджень руху полідисперсних частинок сипких матеріалів у барабанах. Математичне моделювання проведено з використанням методів Монте-Карло та дискретних елементів (МДЕ). Отримано залежності між технологічними параметрами обладнання та однорідністю суміші. Слід зауважити, що у роботі розглядається режим змішування, за якого взаємодії між частинками мають визначальний вплив на рух всієї маси матеріалу. Це ускладнює використання запропонованого підходу при дослідженні роботи змішувачів безперервної дії. У дослідженні [11] вивчається характер руху окремих частинок сипкого середовища, траєкторії руху і час їх перебування в робочій зоні відцентрового змішувача безперервної дії. Отримані результати дозволяють прогнозувати характер руху та форму траєкторії частинок всередині ротора змішувача. Водночас, розроблені математичні моделі не враховують можливі взаємодії частинок між собою.

Результати дослідження процесу змішування полідисперсних матеріалів в барабанних та конічних змішувачах представлені у роботі [12]. Автором визначена залежність якості змішування від технологічних та конструктивних пара-

метрів змішувачів та розмірів частинок. Результати досліджень підтверджені експериментальною перевіркою. Водночас, запропоновані моделі можна застосувати тільки для змішувального обладнання періодичної дії.

Робота [13] присвячена вивченню процесів безперервного приготування сумішей для фармацевтичної промисловості. Представлені результати дослідження впливу пульсацій вхідних потоків компонентів та згладжувальної здатності змішувача на якість суміші. Автором проаналізовано характер руху частинок всередині обладнання та визначено вплив конструктивних і технологічних параметрів на якість суміші. Слід зазначити, що визначення однорідності здійснюється на виході змішувача у зоні вихідного патрубку. Такий підхід не дозволяє отримати інформацію про вплив робочих органів на ефективність змішування та визначити їх вплив на однорідність суміші в цілому.

У роботі [14] авторами запропонована математична модель процесу змішування дисперсних матеріалів, що розроблена на основі методів кореляційного аналізу. Досліджено рух сипких матеріалів у відцентрових змішувачах безперервної дії з конічним ротором, що передбачають наявність випереджуючих потоків частинок. Автори встановили залежність між дисперсіями вхідного та вихідного сигналів, за рахунок чого отримали можливість прогнозувати однорідність потоку на основі відомих коефіцієнтів рециркуляції. Використання такого підходу на практиці ускладнюється необхідністю створення моделей, що зв'язують конструктивні та технологічні параметри обладнання з коефіцієнтами рециркуляції.

Моделі змішування сипких матеріалів для фармацевтичної промисловості у змішувачах безперервної дії двох типів запропоновані у роботі [15]. Дослідження здійснювалось з використанням методів дискретних елементів та систем диференційних рівнянь, що створені на основі класичних законів механіки. У роботі розглядаються режими змішування, за яких практично відсутні розрізнені потоки матеріалу, що ускладнює використання отриманих результатів для відцентрових змішувачів.

У роботі [16] проаналізовано процес змішування частинок сипких матеріалів всередині барабанів, що обертаються. Математичні моделі, створені на основі методу дискретних елементів, дозволили визначити вплив параметрів частинок (коефіцієнтів тертя) на траєкторії їх руху. При цьому, взаємний вплив частинок значно вище ніж у відцентрових змішувачах, що не дозволяє застосовувати отримані результати для цього типу обладнання.

Математичні моделі мікромеханіки руху сипких матеріалів, що створені на основі МДЕ розглядаються у роботі [17]. За їх допомогою авторам вдалось дослідити створення вихорів під час руху сипких матеріалів та їх вплив на траєкторії руху. У роботі досліджуються переважно щільні потоки матеріалів з високим рівнем взаємодії частинок між собою.

Процес змішування трифазних комбінованих систем у відцентрових змішувачах безперервної дії з конічним ротором досліджено у роботі [18]. Визначено вплив рідини на однорідність суміші сипких матеріалів. Запропонована математична модель представлена у вигляді диференційних рівнянь та не враховує траєкторії руху окремих частинок.

Ефективність використання методу дискретних елементів для дослідження руху частинок у бункерах та тарілчастих живильниках безперервної дії показано в роботі [19]. Показано, що використання МДЕ дозволило прогнозувати наявність та величину пульсацій у потоках сипких матеріалів. Отримані результати підтверджені експериментальними дослідженнями. Водночас, застосувати отримані результати для аналізу руху частинок у відцентрових змішувачах практично неможливо. Це пов'язано з тим, що у системі «бункер – тарілчастий живильник» частинки рухаються суцільним потоком. Кількість та інтенсивність взаємодій «частинка – частинка» при цьому значно більше ніж у роторі змішувача.

Аналітичні дослідження руху частинок у роторі відцентрового змішувача представлені в роботі [20]. На основі законів класичної механіки розроблена математична модель руху частинок у роторі, яка представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь. Визначено вплив початкового положення частинок на їх розподіл всередині ротора та на однорідність суміші. Слід зазначити, що запропонована модель є ідеалізованою. Частинки розглядаються як матеріальні точки, не враховано вплив можливих ударних взаємодій між частинками та робочими органами.

Аналіз проведених досліджень свідчить, що для дослідження руху сипких матеріалів використовуються математичні моделі, створені на основі теорії руху суцільних середовищ, реологічних моделей та методу дискретних елементів. При цьому саме МДЕ дозволяє проаналізувати взаємодію окремих частинок між собою та з робочими органами обладнання, що є важливим при дослідженні руху матеріалу у відцентрових змішувачах безперервної дії. Оскільки жоден з методів не відображає повною мірою фізичні процеси, що виникають під час змішування сипких матеріалів, доцільно порівняти результати, отримані за різними математичними моделями, та перевірити їх відповідність реальним траєкторіям частинок. Також важливим завданням при дослідженні змішувачів безперервної дії є визначення ефективності впливу робочих органів на процес змішування, тобто необхідно дослідити саме їх вплив на зміну однорідності суміші. Для ВЗБД це означає створення математичних моделей, що дозволяють визначати розподілення компонентів на виході з ротора в залежності від заданих початкових умов руху частинок, конструктивних та технологічних параметрів обладнання.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є визначення параметрів руху частинок сипкого середовища у роторі відцентрового змішувача, впливу їх початкового положення на форму траєкторій та взаємне розташування частинок на виході ротора.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені наступні задачі:

- визначити вплив урахування геометричних та фізико-механічних параметрів частинок в математичних моделях їх руху всередині ротора ВЗБД на форму та довжину траєкторій, час перебування частинок у змішувачі;
- за допомогою створеної математичної моделі визначити вплив початкових положень частинок на їх розподілення всередині ротора;
- провести експериментальні дослідження руху частинок, оцінити точність розробленої та відомих математичних моделей.

4. Матеріали та методи дослідження руху частинок у відцентровому змішувачі

В роботі розглянуті математичні моделі, що створені на основі класичних законів механіки [20] та методу дискретних елементів. Модель [20] являла собою систему диференціальних рівнянь. Її розв'язок здійснювався методом Рунге-Кутти 4-ого порядку за допомогою програми, що була написана на мові програмування Python (США). Для визначення впливу геометричних розмірів та фізико-механічних параметрів частинок на основі МДЕ розроблена модель, яка складалась з двох частин. Перша представляла собою модель конічного ротора, створену за допомогою системи SolidWorks (Франція). Друга – моделі частинок сипкого матеріалу та їх взаємодії між собою та з ротором, що створені у системі EDEM 2017 (Велика Британія). Розрахунок нормальної складової сил взаємодії між частинками виконувався відповідно до контактної теорії Герця (Hertz, 1882). Розрахунок тангенціальних складових – на основі роботи Мідліна-Дересієвіча [21]. Демпфіруючі компоненти складових сили взаємодії частинок розраховувались на основі коефіцієнтів пружності [22, 23]. Тангенціальна сила тертя визначалась за законом Кулона. Сила тертя кочення визначалась виходячи з обертального моменту частинок.

Експериментальні дослідження здійснювались з використанням дослідного стенду. До його складу входили змішувач безперервної дії, регулятор швидкості обертання ротора, тахометр. При проведенні аналітичних досліджень швидкість обертання ротора та його геометричні розміри дорівнювали аналогічним параметрам дослідного стенду.

Математична обробка результатів, побудова графіків та діаграм здійснювалась за допомогою програм, написаних на мові програмування Python.

5. Результати дослідження руху сипкого середовища у відцентровому змішувачі безперервної дії

5.1. Аналітичне дослідження динаміки руху частинок всередині ротора відцентрового змішувача

Сипкий матеріал подається у змішувач пристроями дозування (живильниками) [19, 24, 25]. Як правило, він надходить у вигляді потоків частинок, кількість яких дорівнює кількості компонентів суміші. Вектори швидкостей частинок у потоках практично співпадають. Оскільки задачею змішувача є приготування однорідної композиції, частинки необхідно максимально рівномірно розподілити всередині його об'єму. Цю задачу в змішувальному обладнанні вирішують за допомогою робочих органів, які змінюють вектори руху частинок взаємодією з їх окремими групами. Основним робочим органом відцентрових змішувачів є ротор, який обертається з заданою кутовою швидкістю. Потоки компонентів суміші потрапляють на дно ротора, і частинки опиняються в полі дії відцентрових сил. Оскільки початкова величина цих сил залежить від відстані до осі обертання, тоді мінімальні відмінності у положенні частинок у вхідних потоках призводять до значної різниці у початкових умовах їх руху всередині ротора. В ідеальному випадку частинки розподіляються рівномірно в об'ємі ротора. Процес змішування відбувається у тонких шарах частинок, що

рухаються по внутрішній поверхні ротора, при перетинанні потоків з різними напрямками руху частинок і взаємодії з конструктивними елементами змішувача. Інтенсифікація процесу змішування забезпечується за допомогою додаткових робочих органів: турбулізаторів, лопатей, додаткових роторів, тощо. Незважаючи на велике розмаїття конструкції та режимів роботи таких пристроїв, їх основним призначенням є розширення діапазону швидкостей та напрямків руху частинок, тобто його максимальна хаотизація. В результаті ймовірність появи локальних групувань частинок знижується, що підвищує однорідність суміші. На рис. 1 показана конструкція відцентрового змішувача безперервної дії з конічним ротором 1, який обертається навколо вертикальної осі Z , що проходить через його центр. Частинки двох компонентів з формувачів потоків 2, 3 надходять у вхідний патрубок змішувача 4 та під дією сили тяжіння падають на дно ротора. Далі під дією відцентрових сил за спіральними траєкторіями підіймаються вздовж бічної поверхні ротора. Після чого вони відбиваються від верхньої частини корпусу 5 та потрапляють у зону між ротором 1 і нижньою частиною корпусу 6. Готова суміш вивантажується через вихідний патрубок 7 за допомогою лопаті 8, що обертається навколо осі Z .

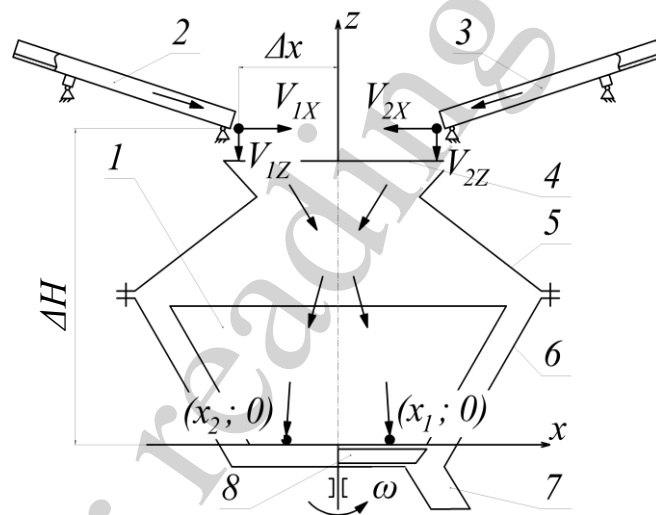


Рис. 1. Схема відцентрового змішувача безперервної дії

Під час роботи змішувача на частинки суміші діють відцентрові сили інерції, сили тертя, тяжіння, кориолісові та аеродинамічні сили. Рух компонентів з високими швидкостями також призводить до руйнування конгломератів частинок під час їх взаємодії з робочими органами обладнання.

Початкові координати руху частинок на дні ротора визначаються їх відстанню від кромки формувачів до вісі обертання ротора Δx та швидкостями (V_1 , V_2) частинок, а також відстанню від дна ротора до формувачів ΔH .

У попередніх дослідженнях [20] на основі законів класичної механіки [22, 23] отримана математична модель руху частинки всередині конічного ротора. При створенні зазначеної моделі [20] було прийнято ряд спрощень. Зокрема, частинки розглядалися у вигляді матеріальних точок, не враховувалися їх пружні властивості. В рамках аналітичних досліджень, представлених у даній роботі, на основі ме-

тоду дискретних елементів [26] розроблена математична модель руху частинок. Вона враховує геометричні параметри частинок, значення їх густини, коефіцієнтів Пуассона та модулів зсуву (табл. 1). За допомогою отриманої моделі розраховано траєкторії руху частинок в конічному роторі відцентрового змішувача безперервної дії. Траєкторії частинок порівнювались з результатами, що були отримані у роботі [20]. Оцінка точності розрахунків здійснювалась на основі порівняння з результатами експериментальних досліджень.

В основі МДЕ лежать закони механіки, які використовуються для визначення координат та швидкостей частинок, характеристик їх взаємодії з іншими частинками та елементами обладнання. Сипкий матеріал розглядається у вигляді сукупності дискретних частинок, які можуть мати різні властивості та форму поверхні. Оскільки у роботі досліджуються процеси змішування гранул полімерних матеріалів, частинки промодельовані як сфери з постійним радіусом.

Таблиця 1
Параметри частинок

Назва параметра	Значення параметра
Форма	Сфера
Радіус, м	0,001
Густина, кг/м ³	2300
Коефіцієнт тертя	0,3
Модуль зсуву, Па	$5,692 \cdot 10^7$
Коефіцієнт Пуассона	0,3

Вхідними параметрами для процесу моделювання МДЕ є положення (x_i ; y_i ; z_i), початкові лінійні (v_{xi} ; v_{yi} ; v_{zi}) та кутові (ω_{xi} ; ω_{yi} ; ω_{zi}) швидкості всіх частинок. Також задаються положення та параметри руху робочих органів обладнання, що взаємодіє з матеріалом. Процес моделювання є ітераційним. Схематично кроки розрахунку МДЕ для i -ої та j -ої частинок показані на рис. 2. Перші два кроки демонструють взаємодію частинок між собою, а третій – з поверхнею обладнання.

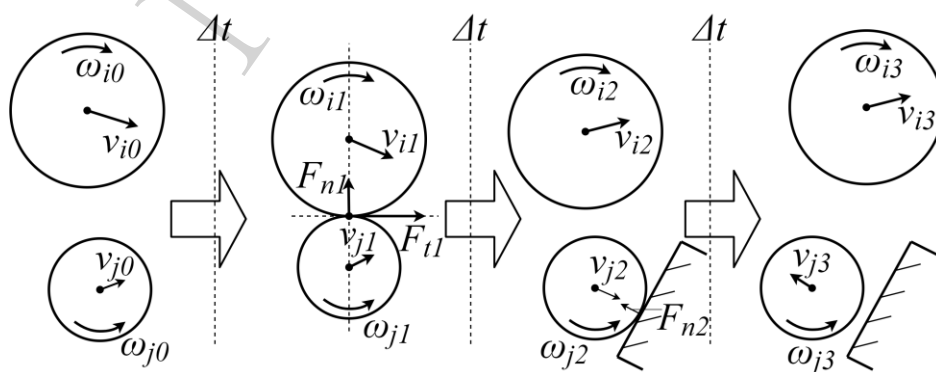


Рис. 2. Схема розрахунку переміщення частинок методом дискретних елементів

На кожному кроці здійснюється розрахунок положення частинок і перевірка можливих взаємодій частинок з елементами обладнання та між собою. За на-

явності таких взаємодій розраховуються величини тангенціальних та нормальних сил, і обчислюються нові вектори швидкостей частинок. На їх основі розраховуються положення частинок на наступному кроці моделювання (через час Δt). Далі цикл розрахунку повторюється.

Перед початком розрахунку визначається крок моделювання Δt . Відомі декілька критеріїв, за якими визначається величина Δt . У роботі використано критерій Релея [21]:

$$\Delta t = \frac{\pi R}{0.163\nu + 0.87766} \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (1)$$

де R , ρ , G , ν – радіус, густина, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона частинки, відповідно.

Розрахунок нормальних та тангенціальних сил взаємодії між частинками та їх моментів інерції здійснювався на основі відомих законів механіки та детально розглянутий у роботі [19].

На рис. 3 показано змодельований рух групи частинок у роторі.

Конструктивні та технологічні параметри конічного ротора представлені у табл. 2. Вибір ротора саме конічної форми здійснено на основі результатів досліджень [1], в яких доведено, що у такому обладнанні досягається кращий змішувальний ефект.

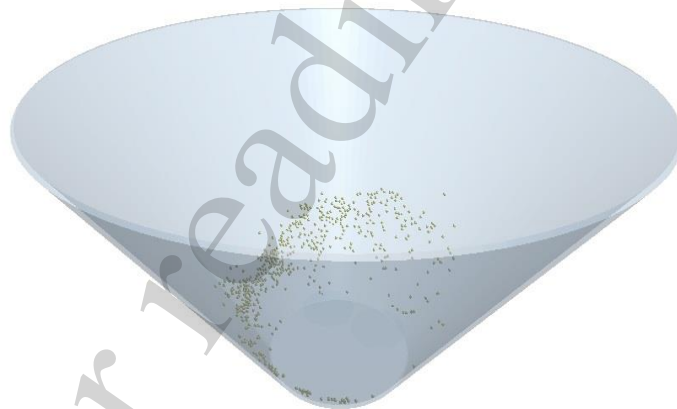


Рис. 3. Змодельований рух частинок у конічному роторі, що обертається навколо вертикальної вісі

Таблиця 2
Параметри конічного ротора змішувача

Назва параметра	Величина
Радіус основи, м	0,051
Висота, м	0,18
Половина кута розтрубу, град	30
Зовнішній радіус, м	0,155
Кутова швидкість обертання, рад/с	120

5. 2. Дослідження траєкторій частинок сипких матеріалів всередині ротора

Під час роботи змішувача компоненти надходять до ротора і падають на його дно. Потім під дією відцентрової сили піднімаються вздовж бічної стінки ротора. Як показано у роботі [19] швидкості та координати частинок на вході у змішувач є випадковими величинами. Водночас, розташування та конструктивні параметри формувачів потоків забезпечують гарантоване потрапляння частинок всередину змішувача. Це означає, що компоненти суміші надходять у змішувач потоками, в яких частинки мають практично однакові вектори швидкостей. Кількість таких потоків щонайменше дорівнює кількості компонентів суміші. У випадку використання турбулізатора, що розділяє потоки на складові частини, вона є кратною кількості вхідних компонентів та залежить від швидкості його обертання. Для визначення впливу додаткових врахованих параметрів частинок на їх траєкторії та розподілення, порівняно з результатами роботи [20], прийняті аналогічні припущення щодо характеристик вхідних потоків.

Зокрема початкові положення потоків частинок, їх кількість та кількість частинок в них були задані так само, як і в роботі [20], а саме:

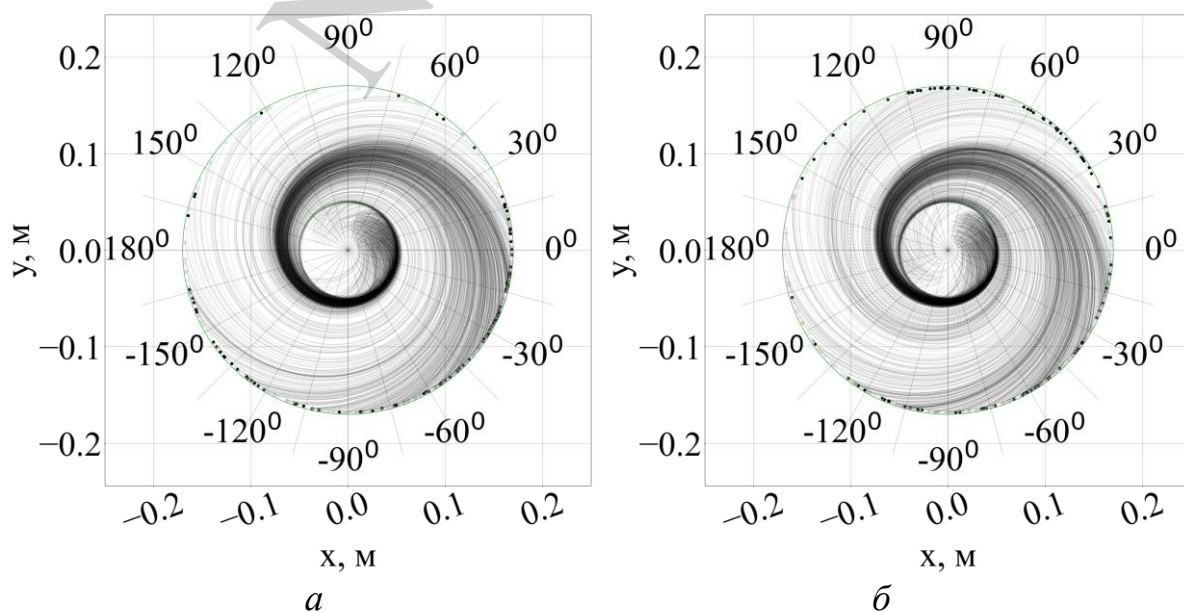
1) Дослід 1. Потік основного компонента (ОК) (400 частинок) надходив у перший квадрант основи ротора, потік ключового компонента (КК) (100 частинок) – у другий квадрант.

2) Дослід 2. Потік ОК (400 частинок) надходив у перший квадрант, потік КК (100 частинок) – у третій квадрант.

3) Дослід 3. ОК надходив двома потоками, що складались з 200 частинок кожний та потрапляли у перший та другий квадранти, КК надходили двома потоками по 50 частинок, що потрапляли у третій та четвертий квадранти.

4) Дослід 4. ОК надходив двома потоками, що складались з 200 частинок кожний та потрапляли у перший та третій квадранти, КК надходив двома потоками по 50 частинок, що потрапляли у другий та четвертий квадранти.

Результати моделювання траєкторій руху частинок за розробленою математичною моделлю МДЕ показані на рис. 4.



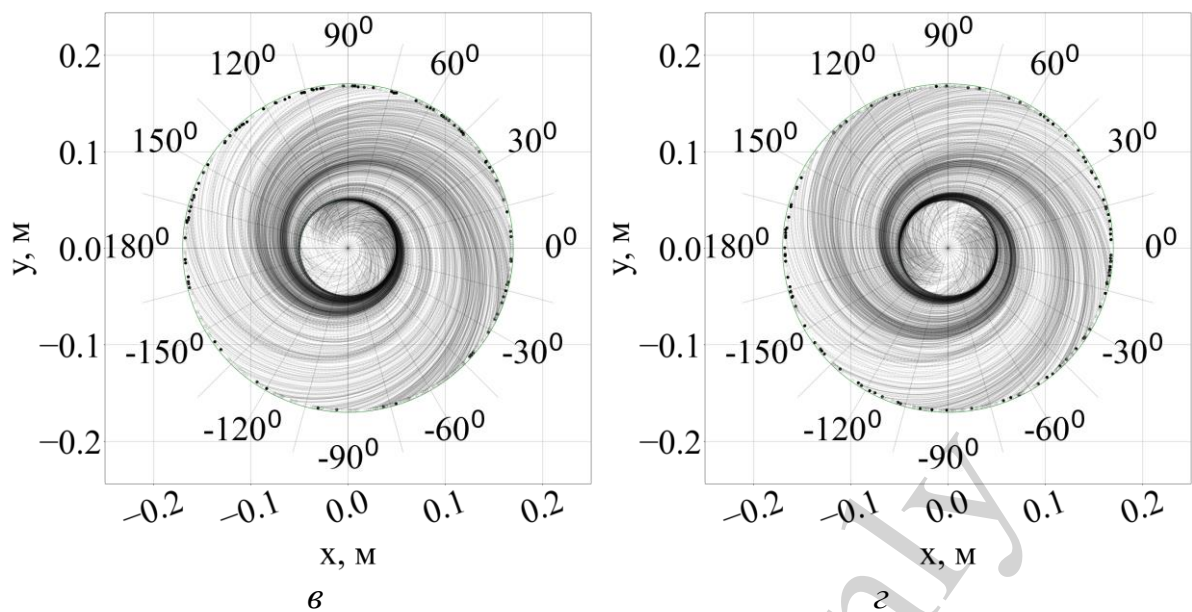


Рис. 4. Траєкторії руху частинок сипкого матеріалу: *а* – дослід 1; *б* – дослід 2; *в* – дослід 3; *г* – дослід 4

Порівняння отриманих результатів з результатами роботи [20] здійснено за певними величинами параметрів траєкторій частинок, які представлені у табл. 3. Для кожного з параметрів розраховані середнє значення, дисперсія та середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 3

Параметри траєкторій руху частинок у конічному роторі

Параметри		МДЕ	Система д/р
Довжина траєкторії вздовж дна ротора, м	Середнє значення, м	0,110	0,031
	Дисперсія	1,38E-03	5,04E-04
	СКВ	2,97E-02	1,75E-02
Довжина траєкторії вздовж бічної стінки, м	Середнє значення, м	0,675	0,239
	Дисперсія	6,71E-03	3,15E-05
	СКВ	6,61E-02	4,73E-03
Час руху частинки вздовж дна, с	Середнє значення, м	0,293	0,029
	Дисперсія	3,40E-03	2,65E-04
	СКВ	4,85E-02	1,25E-02
Час руху частинки вздовж бічної стінки, с	Середнє значення, м	0,373	0,045
	Дисперсія	2,26E-03	5,66E-06
	СКВ	3,64E-02	1,54E-03

Значення, що отримані за допомогою МДЕ, суттєво перевищують значення відповідних параметрів, які розраховані за системою диференціальних рівнянь. Це дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів, що включені у модель, створену за МДЕ.

5. 3. Визначення впливу початкових положень частинок на їх розподілення всередині ротора

Оцінка нерівномірності розподілу частинок здійснювалась методом, запропонованим у роботі [20]. Ротор поділено на сегменти з кроком 15° (рис. 4). В кожному з цих сегментів визначалась кількість частинок основного та ключового компонентів в момент їх виходу з ротора. Гістограми, що відображають кількість частинок ОК та КК в кожному з секторів, показані на рис. 5.

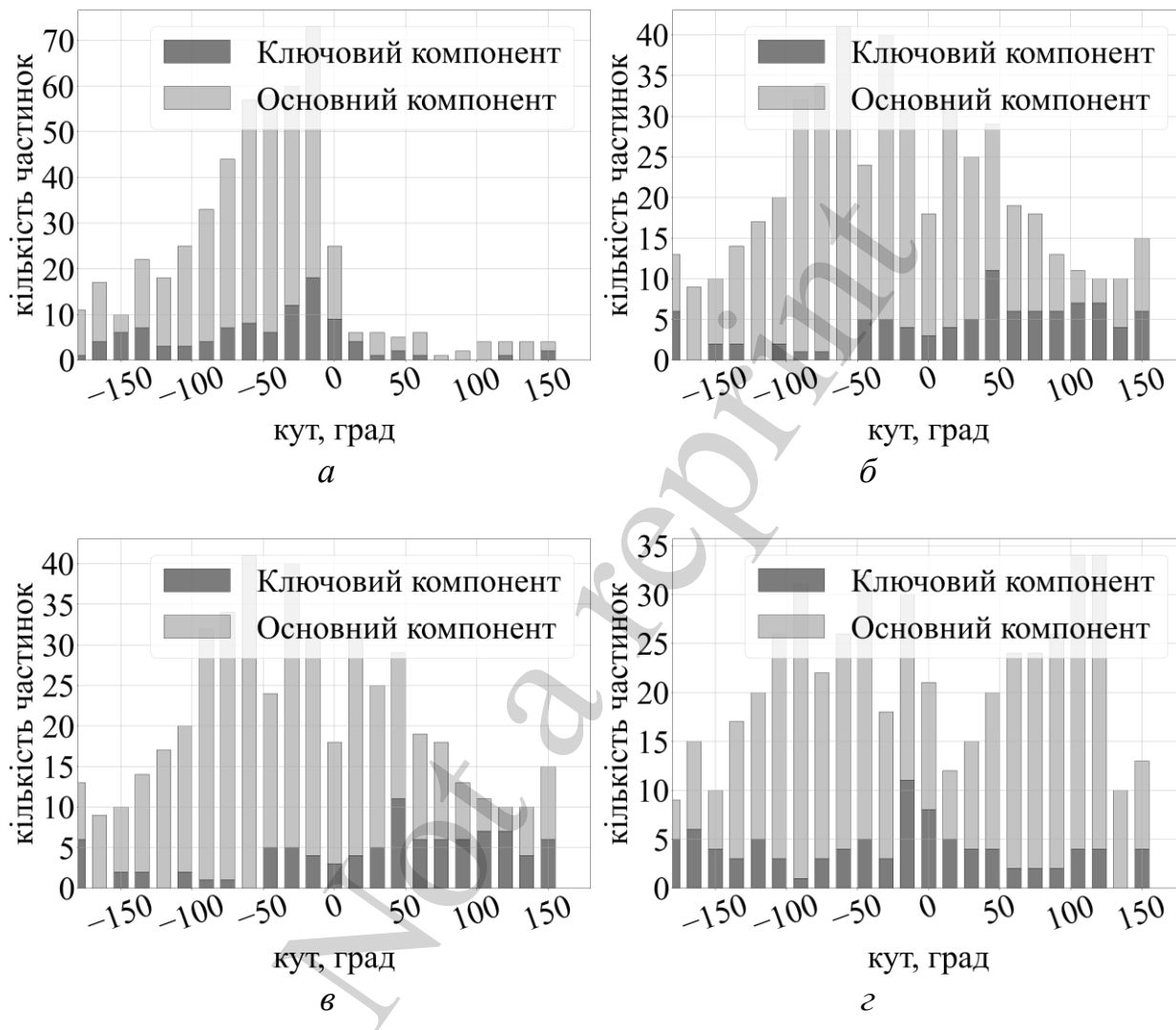


Рис. 5. Гістограми розподілу частинок на виході з конічного ротора: а – дослід 1; б – дослід 2; в – дослід 3; з – дослід 4

Чисельна оцінка розподілення частинок здійснювалась за допомогою коефіцієнта варіації V_c [20]. Результати розрахунків для всіх чотирьох дослідів наведені у табл. 4.

Чисельна оцінка взаємозв'язку між отриманими значеннями коефіцієнтів варіації за МДЕ та розрахованими у роботі [20], здійснювалась за допомогою коефіцієнту кореляції Пірсона

$$r = \frac{\sum (V_{CiDP} - \overline{V_{CiDP}})(V_{CiMDE} - \overline{V_{CiMDE}})}{\sqrt{\sum (V_{CiDP} - \overline{V_{CiDP}})^2 \sum (V_{CiMDE} - \overline{V_{CiMDE}})^2}}, \quad (2)$$

де $\overline{V_{CiDP}}$, $\overline{V_{CiMDE}}$ – середні значення коефіцієнтів варіації, що розраховані за системою диференційних рівнянь [20] та методом дискретних елементів, відповідно; V_{CiDP} , V_{CiMDE} – значення коефіцієнтів варіації, що розраховані за системою диференційних рівнянь [20] та методом дискретних елементів, відповідно.

Таблиця 4

Залежність величини коефіцієнтів варіації від початкового положення потоків компонентів суміші у роторі

№ досліду	V_c розрахований за МДЕ
Дослід 1	92,7 %
Дослід 2	144,1 %
Дослід 3	108,1 %
Дослід 4	78,9 %

В результаті отримане значення $r=0,758$, що підтверджує наявність взаємозв'язку між коефіцієнтами варіації. Відповідно, характер руху частинок, розрахований за математичною моделлю, запропонованою у даній роботі, співпадає з результатами розрахунків у роботі [20].

Різниця між розрахованими значеннями коефіцієнтів варіації, значно менша ніж різниця між параметрами траєкторій частинок (табл. 2). Це свідчить, що визначальний вплив на розподіл компонентів має характер їх руху (спіральна форма траєкторії), а не параметри взаємодії частинок між собою та з елементами обладнання.

5. 4. Експериментальні дослідження руху частинок всередині ротора.

З метою перевірки отриманих результатів проведено дослідження руху частинок всередині конічного ротора. Для проведення досліджень частинка покривалась фарбою та опускалась на дно ротора, що обертався з заданою швидкістю. Його внутрішня поверхня закривалась паперовою вставкою, на якій під час руху частинки залишався відбиток від фарби. Частинка під дією відцентрових сил переміщувалась по основі ротора, його бічній стінці та вилітала зі змішувача через вихідний патрубок. Після виходу частинки змішувач зупинявся і в роторі замінювалась паперова вставка. Далі швидкість ротора знову збільшувалась до заданої величини, після чого у змішувач опускалась наступна частинка. Експеримент повторювався для 20 частинок. В результаті були отримані відбитки 20 траєкторій. Для кожної точки переходу частинки з dna ротора на його бічну стінку задавались координати $(R_0; 0; 0)$. Таким чином, всі траєкторії частинок зводились в одну точку. Далі бічна поверхня розділялась на сектори з кроком 10° . Визначались координати точок перетину всіх траєкторій частинок з

границями секторів. Після цього розраховувались середні значення цих координат для кожного з секторів. Ці розрахунки проводились лише для суцільної частини траєкторій. Оскільки внаслідок дії вібрацій, що виникали під час роботи дослідного стенду, у траєкторіях з'являлись «розриви» та «стрибки». Більшість таких «розривів» спостерігалась наприкінці траєкторії. Тому при обробці експериментальних даних враховувалась частина траєкторії від основи ротора до рівня $z=0,0463$ м. Для цієї ділянки були отримані відбитки траєкторій всіх частинок без «розривів». В результаті була розрахована «середня» траєкторія руху частинки вздовж бічної стінки ротора.

Отримані результати показані на рис. 6.

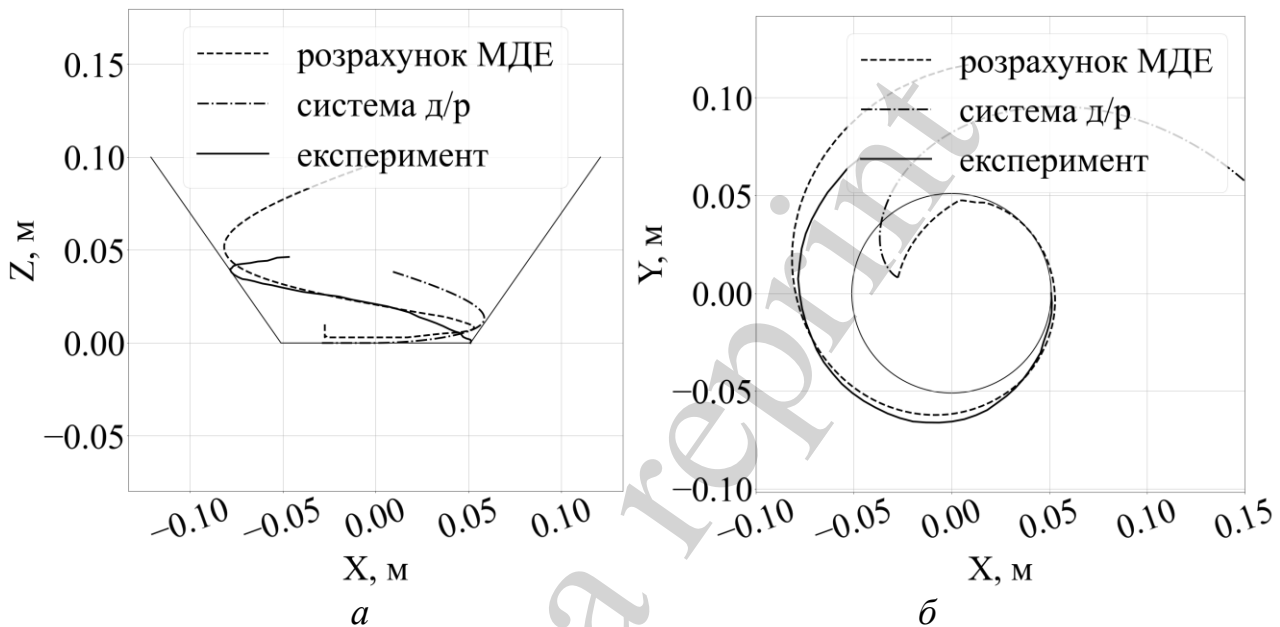


Рис. 6. Траєкторії руху частинки, що визначені на основі МДЕ, математичної моделі роботи [20] та експериментально: *а* - вигляд збоку; *б* - вигляд згори

Форма траєкторії, що визначена за МДЕ, значно ближча до експериментальної. Для кількісної оцінки різниці між траєкторіями, що отримані різними методами, розраховані довжини всіх трьох траєкторій для ділянки від початку бічної стінки ротора до рівня $z=0,0463$ м. В результаті отримані наступні значення:

- довжина траєкторії, що визначена експериментально – $L_e=0,288$ м;
- довжина траєкторії, що розрахована за математичною моделлю роботи [20] – $L_d=0,021$ м (у 13,7 разів менша, ніж довжина експериментальної);
- довжина траєкторії, що розрахована методом дискретних елементів – $L_m=0,238$ м (у 1,2 разів менша, ніж довжина експериментальної).

Ці результати підтверджують, що урахування геометричних та фізико-механічних параметрів частинок дозволяє підвищити точність розрахунку параметрів їх руху.

6. Обговорення результатів дослідження руху сипкого середовища у відцентровому змішувачі безперервної дії

Всі проведені у роботі дослідження (рис. 4–6) підтверджують, що траєкторія руху частинок в роторі має форму спіралі. Водночас, при розрахунках на основі МДЕ ця спіраль має більшу кількість витків та, відповідно, більшу довжину траєкторії. Це відображається на рис. 4 більш густим розташуванням витків порівняно з аналогічними рисунками у роботі [20]. Запропонована у роботі математична модель показала особливості руху частинок при переході з основи на бічну стінку ротора. В цій зоні форма траєкторії частинок на деякий час стає круговою, а пізніше знову змінюється на спіральну. В результаті частинки рухаються вздовж бічної стінки з меншими початковими швидкостями, що призводить до збільшення довжини траєкторії. Цей ефект можна пояснити ударом частинки о бічну поверхню конуса, що зменшує складову швидкості, яка спрямована вздовж радіусу. Математична модель, представлена в роботі [20] цей ефект не враховує. Наявність кругових траєкторій в зоні переходу з основи на бічну стінку ротора свідчить про збільшення кількості взаємодій між частинками. Ці взаємодії впливають на форму траєкторій та враховується при дослідженнях МДЕ.

Параметри траєкторій визначені за запропонованою у роботі моделлю та моделлю, представленою у роботі [20], також суттєво відрізняються. Так, довжина траєкторії відрізняється у 2,9 рази, а час руху – у 9 разів. При цьому, розрахунки за моделлю роботи [20] показують менші значення часу руху та довжини траєкторії. Такий результат свідчить про суттєвий вплив факторів, що враховані у моделі, створеної на основі МДЕ, а саме: геометричних параметрів частинок, значення їх густини, коефіцієнтів Пуассона, модулів зсуву та взаємодії між частинками. Таким чином, МДЕ дозволяє з більшою точністю визначити швидкості частинок, час їх руху та запас матеріалу у роторі.

З точки зору оцінки однорідності, принципово важливим є вплив параметрів ротора на розташування частинок на його виході.

Гістограми розподілу частинок, які показані на рис. 5, свідчать, що частинки розподіляються не рівномірно вздовж зовнішньої кромки ротора. У випадку ідеального розподілу кількість частинок в усіх секторах має бути однаковою, але на практиці частинки розташовуються нерівномірно. Аналіз оцінки однорідності (табл. 4) показав, що найнижчі значення коефіцієнтів варіації отримані за умов розділення ОК та КК на два потоки та надходження їх у протилежні квадранти ротора змішувача. Цей результат підтверджується обома математичними моделями, що добре видно на рис. 4, *г* та рис. 5, *г*. Таким чином, забезпечити підвищення однорідності суміші можна за рахунок зведення центрів вхідних потоків її компонентів. В цьому випадку результати розрахунків за математичною моделлю, розробленою на основі МДЕ, практично співпадають з результатами отриманими у роботі [20].

Експериментальні дослідження підтвердили, що частинки рухаються за спіральними траєкторіями. Водночас, результати, що отримані за допомогою МДЕ ближчі до експериментальних. Це пояснюється більшою кількістю пара-

метрів частинок, які враховані при створенні моделі, та урахуванням пружної взаємодії між частинками та бічною стінкою ротора.

В цілому, моделі, що отримані МДЕ, забезпечують більшу точність, але порівняно з моделями на основі класичних систем диференціальних рівнянь [20] їх створення потребує більшої кількості інформації про властивості об'єктів та параметри їх взаємодії.

Слід зазначити, що обидві моделі не враховують ряд факторів, які впливають на рух частинок у реальному обладнанні. Зокрема не враховані: вібрації ротора, вплив форми частинок, можливі зміни коефіцієнтів тертя внаслідок дії зовнішніх умов (наприклад, вологості), наявність електростатичних сил. Ці параметри можуть бути включені у модель на основі МДЕ. Проте визначення фактичних значень цих параметрів та діапазонів їх змін у реальних умовах потребує подальших досліджень.

7. Висновки

1. Створено математичну модель на основі МДЕ, яка враховує геометричні та фізико-механічні параметри частинок. Визначено, що при розрахунках МДЕ довжина траєкторії частинок у 2,9, а час руху – у 9 разів більші ніж визначені за системою диференціальних рівнянь. Виявлено наявність кругових траєкторій в зоні переходу з основи на бічну стінку ротора, що підтверджує ефективність використання запропонованої моделі.

2. Встановлено, що визначені за розробленою та відомими математичними моделями розподілення частинок мають однаковий характер (коефіцієнт кореляції дорівнює 0,758). Різниця між значеннями коефіцієнтів варіації, що відповідають розглянутим у дослідженні початковим положенням ОК та КК, становить 42,9 %. Цей результат підтверджує ефективність використання турбулізаторів у ВЗБД.

3. На основі експериментальних досліджень вивчено рух частинок та перевірено точність розробленої та відомих математичних моделей. Встановлено, що довжина траєкторій розрахована за МДЕ у 1,2 рази менша за експериментальні. Водночас, довжина траєкторій розрахована за відомими математичними моделями [20] у 13,7 рази менша за експериментальні.

Література

1. Стаценко, В. В., Бурмістенков, О. П., Біла, Т. Я. (2017). Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів. Київ: КНУТД, 219.
2. Бурмістенков, О. П. та ін. (2011). Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості. Київ: КНУТД, 135.
3. Бурмістенков, О. П. та ін.; Коновал, В. П. (Ред.) (2007). Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантереїній промисловості. Хмельницький: [б.в.], 255.
4. Генералов, М. Б. (2002). Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. Калуга: Н. Бочкаревой, 592.

5. Ахмадиев, Ф. Г., Александровский, А. А. (1988). Моделирование и реализация способов приготовления смесей. Журн. Всесоюз. хим. общ-ва им. Д.И. Менделеева, 33 (4), 448.
6. Бакин, И. А., Саблинский, А. И., Белоусов, Г. Н. (2003). Комплексное моделирование процессов непрерывного смесеприготовления. Технология и техника пищевых производств. Сборник научных работ. Кемерово: КемТИПП, 137–141.
7. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). Studying the Main Design Parameters of Linkage Mechanisms of Part-Processing Machines with Two Working Barrels. International Applied Mechanics, 56 (6), 762–772. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01053-x>
8. Глобин, А. Н. (2009). Пути совершенствования дозирующих устройств. Совершенствование технологических процессов и технических средств в АПК. Сб. научн. Тр. АЧГАА. Зерноград, 5–6.
9. Synyuk, O., Musiał, J., Zlotenko, B., Kulik, T. (2020). Development of Equipment for Injection Molding of Polymer Products Filled with Recycled Polymer Waste. Polymers, 12 (11), 2725. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12112725>
10. Third, J. R., Scott, D. M., Lu, G., Müller, C. R. (2015). Modelling axial dispersion of granular material in inclined rotating cylinders with bulk flow. Granular Matter, 17 (1), 33–41. doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0542-0>
11. Біла, Т. Я., Стаценко, В. В. (2006). Аналітичне дослідження руху часток суміші у двороторному змішувачі безперервної дії. Вісник КНУТД, 5, 30–34.
12. Alchikh-Sulaiman, B. (2011). Assessment of the Mixing of Polydisperse Solid Particles in the Rotary Drum and Slant Cone Mixers Using Discrete Element Method. Ryerson University. URL: <https://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA%3A3326/datastream/OBJ/view>
13. Pellegrini, M. (2014). DEM simulation of continuous pharmaceutical powders mixing effect of non-constant feeding on mixing quality. Santomaso, Andrea. URL: <http://tesi.cab.unipd.it/45721/>
14. Бородулин, Д. М., Андрюшков, А. А. (2009). Прогнозирование сглаживающей способности центробежного смесителя на основе корреляционного анализа. Техника и технология пищевых производств, 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-sglazhivayuschey-sposobnosti-tsentrobezhnogo-smesitelya-na-osnove-korrelyatsionnogo-analiza>
15. Pernenkil, L. (2008). Continuous blending of dry pharmaceutical powders. Massachusetts Institute of Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/38003180_Continuous_blending_of_dry_pharmaceutical_powders
16. De Monaco, G. (2015). 3D finite volume simulations of dense granular flow inside rotating cylinders. Università degli Studi di Napoli Federico II. 2015. doi: <http://doi.org/10.6092/UNINA/FEDOA/10410>
17. Prashidha, K. (2018). Internal Dynamics and Flow Properties of Dense Granular Materials. A thesis. The University of Sydney. URL: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/19647>

18. Popov, A. M., Tikhonov, V. V., Tikhonov, N. V., Borodulin, D. M. (2014). Reception of Two and Three-phase Combined Dispersive Systems with the Use of Centrifugal Mixer. *Procedia Chemistry*, 10, 400–409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.067>
19. Statsenko, V., Burmistenkov, O., Bila, T., Statsenko, D. (2019). Determining the motion character of loose materials in the system of continuous action «hopper – reciprocating plate feeder». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (98)), 21–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163545>
20. Стаценко, В. В., Бурмістенков, О. П., Біла, Т. Я. (2020). Визначення розподілення частинок сипких матеріалів під час перемішування у роторі відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Хмельницького національного університету*, 1 (281), 238–244. URL: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/39-3.pdf>
21. Yan, Z., Wilkinson, S. K., Stitt, E. H., Marigo, M. (2015). Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*, 2 (3), 283–299. doi: <https://doi.org/10.1007/s40571-015-0056-5>
22. Попов, В. Л. (2012). *Механика контактного взаимодействия и физика трения*. М.: Физматлит, 348.
23. Mindlin, R. D., Deresiewicz, H. (1953). Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Forces. *J. Appl. Mech.*, 20, 327–344.
24. Марсов, В. И., Суэтина, Т. А., Колбасин, А. М., Шухин, В. В. (2013). Дозаторы непрерывного действия с компенсацией возмущения входного потока материала. *Механизация строительства*, 2, 32–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18834562>
25. Magalhães, F. G. R., Atman, A. P. F., Moreira, J. G., Herrmann, H. J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*, 18 (2). doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0636-y>
26. Munjiza, A. (2004). *The Combined Finite-Discrete Element Method*. Wiley, 348. URL: <https://www.wiley.com/en-us/The+Combined+Finite+Discrete+Element+Method-p-9780470020173>